

Jussi Hoivala

KOEJÄRJESTELYIDEN VAIKUTUS TII- VIYSKOKEEN TULOKSIIN

Teknisten tieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jussi Hoivala: Koejärjestelyiden vaikutus tiiviyskokeen tuloksiin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2019

Tutkin kandityössäni tiiviyskoetta ja sen koejärjestelyitä. Tiiviyskokeessa tutkitaan tiivistettä, jonka toiminnassa havaittu ongelmia ja sen toiminta on tuntematon muuttuvissa olosuhteissa. Tämä työ esittelee testiin liittyviä koejärjestelyitä ja tutkii millä tavoin ne voivat vaikuttaa testin tuloksiin. Työssä tutkitaan olosuhteita, joissa testi tehdään, kuten lämpötila. Olen työssäni toivonut löytäväni tekijöitä, jotka vaikuttavat testien tuloksiin. Toisaalta myös olen halunnut selvittää, että testit ovat sellaisia, joilla voidaan löytää haluttuja tuloksia. Tarkastelen testejä ja koejärjestelyitä projektin ulkopuolelta. Näin käytössäni oleva tieto perustuu projektista tehtyyn dokumentaatioon ja kirjallisuuteen.

Ongelma on, että tiivistettä ei voida tutkia todellisessa käyttötilanteessa. Tämän takia täytyy tehdä keinotekoisesti testitilanne, jossa olosuhteita valvotaan ja tiivistettä päästään tutkimaan. Käytännössä nämä olosuhteet ja niitä mallintavat järjestelmät eroavat hieman todellisesta. Tämä työ tutkii kyseisiä poikkeamia ja pyrkii arviomaan niiden vaikutusta tutkimustuloksiin.

Aiheesta löytyy kirjallisuutta, mutta ne usein perustuvat samaan alkulähteeseen. Kirjallisuudessa esiintyy usein, että tiivisteiden täydellistä toiminta periaatetta ei täysin tunneta. Kyseisen mallisia tiivisteitä on kuitenkin käytetty todella pitkään ja käytännön kokeita niille on suoritettu paljon. Kuitenkaan täysin vastaavaa lähdettä en löytänyt, jossa tiiviste liittyisi nimenomaan potkurilaitteiston akselintiivisteeseen. Tälle tiivisteelle ominainen piirre on se, että se on vaikeasti vaihdettavissa ja vuotava öljy voi päätyä mereen.

Tutkimuksillani toivon olevan vaikutusta siihen, että tiivisteestä aiheutuvat ympäristöongelmat ja huoltokulut vähenevät. Toivon, että edustamani yrityksen tuote kehittyy paremmaksi ja siten tuottaa tulosta yritykselle ja sen asiakkaille.

Työssä tutustutaan testeihin, koejärjestelyihin ja tiivisteiden toimintaperiaatteeseen. Lopuksi tutkitut asiat yhdistyvät tuloksiin ja päätelmiin, jossa pyrin selvittämään tutkimuksieni tuloksia käyttäen apuna kirjallisuudesta löytämäni sisältöä.

Avainsanat: tiiviste, tiiviyskoe, koejärjestelyt, meriteollisuus, Aft- tiiviste, kunnossapito

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AKSELIN TIIVISTYS	3
2.1 Akselin tiivistykseen vaikuttavat tekijät	3
2.2 Vikaantumistyytit	4
2.3 Huulitiivisteiden poikkileikkaus	5
2.4 Huulitiivisteiden toimintaperiaate	6
3. TESTIN ESITTELY	8
3.1 Testilaitteisto	8
3.2 Tiivistepakka ja painejärjestelmä	10
3.3 Testisarjat	10
3.3.1 Ensimmäinen testisarja	10
3.3.2 Toinen testisarja	11
3.3.3 Kolmas testisarja	12
4. KOEJÄRJESTELYT	13
4.1 Lämpötila	13
4.1.1 Lämpötilan vaikutus öljyyn	13
4.1.2 Lämpötilan vaikutus tiivisteeseen	13
4.2 Laakerin öljytilan erot	14
4.3 Voitelujärjestelmä ja järjestelmämuutokset	14
4.3.1 Järjestelmämuutokset	14
4.4 Öljyn ja veden laatupoikkeamat	15
5. TULOKSET JA PÄÄTELMÄT	16
LÄHTEET	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABB	Asea Brown Boveri
ACU	Air Control Unit
AFT-tiiviste	Potkuriakselin tiiviste
Azipod	Azimuthing Podded Drive
Laineri	Akselille, tiivistettä vasten asetettava pinnoitettu holkki
PTFE	polytetrafluorieteeni eli teflon
RSS	Radial Shaft Seal
SI-järjestelmä	ransk. Système international d'unités, kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

1. JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö pohjautuu testiin, jonka ABB suorittaa selvittääkseen öljyn kulumista Azipod laitteissaan. Työ tarkastelee koejärjestelyitä, joilla voi olla vaikutusta testin tuloksiin. Azipod on ruoripotkurijärjestelmä, joka korvaa perinteisen potkurijärjestelmän laivassa tai muussa merellä käytettävässä aluksessa. Kuva 1 esittää Azipod XO laitteen kokonaisuudessaan. Järjestelmässä on sähköinen voimantuotto. Sähkömoottori on kapselin sisällä, joka sijaitsee laivan rungon ulkopuolelle. Sähkömoottori on suorassa yhteydessä potkurin kanssa ilman vaihdetta. Kapselia pystytään kääntämään täysi kierros sen pystyakselin suhteen. (ABB 2010)

Toimivat tiivisteet ovat merkittävä asia ympäristön kannalta. Testattavan tiivisteen sijainti on hankala, sillä vuodolla on suuri riski sekoittaa meriveteen. Öljyn saastuttama merivesi on erittäin laajasti tutkittu aihealue. Öljy on laajimmalle levinnyt ympäristösaaste (Santas et al., 1999). Tämän takia havaittu vuoto on otettava vakavasti ja sen aiheuttaman juurisyyn tutkintaan on panostettava. Azipod laitteiden toiminta-alueella on laitteiden käytettävyyden avainasemassa. Pienikin öljyvuoto voi pahimmillaan estää aluksen käytön ja siten ympäristön lisäksi asiakkaan yritystoiminta kärsii. Azipodin etuihin kuuluu korkea hyötysuhde ja helpompi liikuteltavuus satamissa ja siten parempi käytettävyyden. Öljyvuoto voi siis heikentää laitteen parhaita ominaisuuksia.

Laatuongelmat sitovat yrityksen resursseja. Yritys joutuu sijoittamaan omia henkilöitään, laitteitaan ja toimitilojaan laatuongelmien ratkaisemiseksi. Nämä kulut vähentävät yrityksen katetta ja sitä kautta vaikuttaa heikentävästi yrityksen toimintaan kauttaaltaan. Tästä syystä laatuongelmien ratkaisemiseksi on tehtävä töitä mahdollisimman nopeasti. Ongelmien nopea ratkaisu vähentää yksittäisen ongelman kulujen kumuloitumista. Pitkäaikaisilla laatuongelmilla on myös erittäin negatiivinen vaikutus yrityksen imagoon ja asiakassuhteisiin.

Öljyn kulumisesta ja siihen johtavista mekanismeista on tullut mielenkiintoisia havaittujen ongelmien takia. Merkittävää öljyn kulumista on havaittu useiden eri asiakkaiden laitteissa. Havaintojen kasvun on huomattu olevan yhteydessä AFT-tiivisteen materiaalin vaihtoon ja se on liitetty myös jäälaitteisiin. Myöhemmin työssä esitetään, kuinka nämä asiat huomioidaan testeissä.

Työn tarkoitus on tukea testin suunnittelijoita määrittämään testin kannalta merkittäviä tekijöitä, joihin koejärjestelyt vaikuttavat. Tavoitteena on, että testistä voidaan poistaa tuloksiin ratkaisevasti vaikuttavat ulkoiset tekijät. Tässä työssä keskitytään näistä ulkoisista tekijöistä niihin, jotka mahdollisesti esiintyvät vain koeympäristössä. Todellisen laitteen siirtäminen koeympäristöön aiheuttaa muutoksia, joita tässä työssä kutsutaan koejärjestelyiksi. Tutkittaviksi koejärjestelyiksi on valittu sellaisia, jotka ovat kokeen kanssa työskentelevien insinöörien kanssa koettu merkittävimmiksi.

Työssä ensimmäisenä esitellään testit ja testilaitteisto. Tässä vaiheessa jo hieman alustetaan tiivisteen toimintaperiaatetta, jolloin testissä käytettävä laitteisto saa merkityksen. Työssä esitetään myös yleisiä asioita, jotka liittyvät akselin tiivistykseen ja niiden suunnitteluun. Työn tärkeimpänä osana on koejärjestelyt ja pohdinta millä tavalla erilaiset järjestelyt vaikuttavat tuloksiin.

On vielä syytä mainita, että testin kehitystyö on vielä tätä työtä tehdessä kesken. Tämä työ perustuu siis keskeneräisiin tietoihin ja testin yhteen suunnitteluvaiheeseen versioon.



Kuva 1. Azipod XO (ABB 2019)

2. AKSELIN TIIVISTYS

Akselin tiivistys on laaja aihealue. Se sisältää erilaisia variaatioita, joissa muuttuu kierrosnopeudet ja akselihalkaisijat. Akselitiivisteitä käytetään hyvin erilaisissa laitteissa, kuten pumpuissa, moottoreissa, turbiineissa ja kompressoreissa. Tämän lisäksi tiivistykseen vaikuttaa, tämänkin työn kannalta tärkeä asia, olosuhteet tiivisteiden molemmiin puoliin. Jokaisella yksittäisellä tapauksella on omat tarkat vaatimuksensa. Yleisesti käytössä olevat akselitiivisteet voidaan jakaa kolmeen laajaan kategoriaan (Flitney 2007):

- Elastomeerihuulitiivisteet. Näitä tiivisteitä käytetään tilanteissa, joissa pyritään estämään nesteiden siirtyminen.
- Muovitiivisteet (PTFE). Näillä tiivisteillä on oma roolinsa, kun tiiviste ei saa jatkuvaa voitelua.
- Laakeritiivisteet, jotka ovat erityistyyppisiä huulitiivisteitä. Näille tiivisteille ominaista on pienet pintapaineet ja tärkeimpänä tehtävänä on pitää epäpuhtaudet laakerin ulkopuolella.

Tämän työn kannalta oleellinen tiivistetyyppi on elastomeerihuulitiivisteet. Azipodin akselitiivisteiden tehtävänä on nesteiden siirtymisen hallinta. Muovitiivisteille ei ole kuitenkaan käyttöä, sillä vähintäänkin tiivisteiden toisella puolella on jatkuvasti öljyä saatavilla. Tiivisteiden ja lainerin väliin syntyykin öljykalvo, joka vähentää tiivisteiden ja lainerin kulumista. On tärkeä huomata, että lainerin pinnanlaatu ja valmistusmetodi ovat tärkeitä tekijöitä tiiveyden kannalta. Tästä syystä tiivistyspinta ei olekaan suoraa akselillä vaan erillisellä komponentilla, lainerilla. Hyvän tiivistyspinnan luominen erillisille asennettavalle komponentille on helpompaa, kuin kokonaiselle akselille. Kokonaisen monta tonnia painavan akselin käsitteleminen on hankalaa ja vaarallista. Laineri on tätä huomattavasti pienempi komponentti. Tiivistyspinnan ollessa lainerilla ei myöskään todelliseksi akselille ole tässä testissä tarvetta.

Yleisesti huulitiivisteet on suunniteltu toimivan hyvin pienellä tai olemattomalla ulkoisella paineella. Merkittävät tiivistevalmistajat ovat ilmoittaneet maksimi paineeksi 0.3 – 0.5 bar:ia. Tätä suuremmat paineet aiheuttavat korkeampia lämpötiloja ja kulumista tiivisteessä. Tätä suuremmille paineille on kehitetty erityistyyppiset tiivisteet. (Flitney 2007)

Tiivisteiden ominaisuuksiin kuuluu jonkin asteinen läpivuoto. Tiiviste voi siis kulua hiljalleen ja saavuttaa rajapyykin, jolloin se täytyy vaihtaa. Toisaalta, jos kulunut tiiviste voi vielä tiivistää kevyellä rasituksella. Mekaanisilla komponenteilla on usein selvää, koska ne ovat käyttökelvottomia. Tiivisteiden kanssa asia ei ole niin yksiselitteinen. Tiivisteiden valmistajat antavatkin oman arviotensa normaalille vuodon määrälle.

2.1 Akselin tiivistykseen vaikuttavat tekijät

Testien valmistelussa ja suunnittelussa täytyy huomata, että jopa 30% akselitiivisteistä (RSS) pettävät asennusvirheiden takia (Klein 2010). Muita tiivisteiden elinikään vaikuttavia tekijöitä on Klein et al. mukaan monia. Näistä tekijöistä keskusteltaessa on käsiteltävä tiivistystä ympäröivien komponenttien systeeminä. Näiden komponenttien vaikutukset toisiinsa täytyy ottaa huomioon. Vielä sen lisäksi täytyy huomioida systeemiä ympäröivät olosuhteet.

Tiiviste toimii systeemin pääkomponenttina, ja siten on myös merkittävässä roolissa tiiveyden luotettavuudessa. Tiivisteiden toimintaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: materiaali ja geometria. Materiaaliominaisuuksiin ja siten myös tiiveyteen vaikuttaa merkittävästi lämpötila vaihtelut. Suuressa roolissa on myös fluidi, jonka siirtymistä pyritään estämään. (Klein 2010)

Muita tekijöitä, jotka Klein et al. mainitsee, julkaisussaan on lainerin ja tiivisteiden tukirakenteiden valmistusmenetelmät ja tiivisteiden varastoinnissa mahdollinen ultraviolettia säteilylle altistuminen ja hapettuminen.

2.2 Vikaantumistyytit

Vikaantumistyytit täytyy tuntea, jotta testien tuloksia voidaan ymmärtää. Testien suunnittelussa on hyvä ymmärtää minkälaiset ovat yleisimmät vikaantumistyytit ja miten ne kehittyvät. Testien kannalta on tärkeää ymmärtää etenkin ne vikaantumistyytit, joihin voidaan testeissä vaikuttaa. Näistä on syytä mainita ainakin asennuksessa tapahtuvat virheet. Tiivisteissä ilmenee myös virheitä, jotka ovat peräisin valmistusprosessista. Niihin ei voida kuitenkaan vaikuttaa testien yhteydessä.

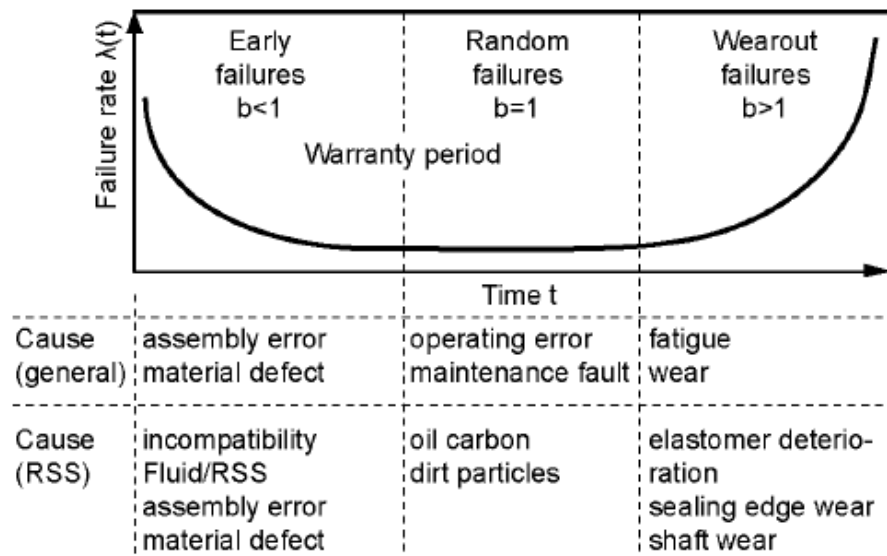
Huulitiivisteiden vikaantumistyytit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: mekaanisiin ja lämpökemiallisiin vikatyyppeihin. Mekaanisilla vikaantumistyypeillä tarkoitetaan tapauksia, joissa joko tiiviste on kulunut tai sitä vasten oleva lainerin pinta on kulunut. Molemmissa tapauksissa muutos on samankaltainen. Pintapaine pienenee ja tiivistyspinnan muoto muuttuu. Nämä muutokset johtavat pumppausmekanismin heikkenemiseen ja siten vuotomäärän kasvuun. (Klein 2010)

Lämpökemialliset vikaantumistyytit muuttavat tiivisteiden tai fluidin ominaisuuksia. Merkittävämmäksi syyksi Klein et. al. Mainitsee paikallisen lämpötilan tiivisteiden reunalla tai öljysäiliössä. Korkea öljyn lämpötila tietysti vaikuttaa myös tiivisteiden lämpötilaan. (Klein 2010)

Korkea lämpötila tiivisteiden reunassa johtaa materiaaliin paikalliseen kovettumiseen tai lasittumiseen (glazing). Tämä heikentää pumppausmekanismeja ja voi johtaa jopa reunan halkeiluun. Vastaavasti korkea öljyn lämpötila heikentää tiivisteiden elastisuutta. Tiivisteiden ja lainerin välinen pintapaine heikkenee ja aiheuttaa vuotoa. Korkeammassa lämpötilassa öljy voi myös alkaa sakautua (deposit) tiivisteiden reunalle. Kun tiiviste pinnalla esiintyy epäpuhtauksia aiheuttaa se vuodon kasvua. (Klein 2010)

Kaikille näille edellä mainituille vikaantumistyypeille on yhteistä vuodon lisääntyminen. Juuri syyn selvittäminen vaatii tarkempaa tutkimista tiivisteestä, akselistä, öljystä ja lainerista. (Klein 2010)

Edellä mainitut vikaantumistyytit esiintyvät eri kohdissa tiivisteiden elinkaareissa. Klein et. al. käyttää elinkaaren vikaantumisaikajakoja esittävälle kuvaajalle nimitystä kylpyammekurvi (bath-tub curve).

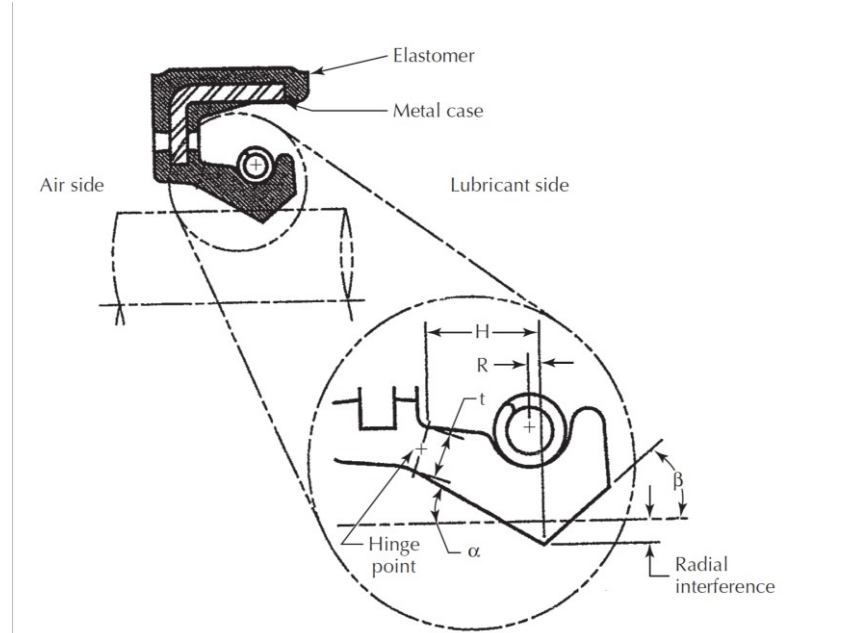


Kuva 2. Vikaantuminen tiivisteiden elinkaaren aikana. (Klein 2010)

Kuvasta 2 havaitaan korkeat vikatiheydet elinkaaren alussa ja lopussa. Alun viat selittävät virheet valmistus ja asennus prosesseissa. Elinkaaren lopussa vikaantuminen kasvaa kulumisen ja väsymisen vuoksi. Jos tiiviste vikaantuu näin myöhään elinkaaren aikana, on se toiminut suunnitellusti. Elinkaareen keskellä esiintyvät viat voivat johtua huollon yhteydessä tehdyistä virheistä tai rasituksesta, johon tiivistettä ei ole suunniteltu. Esimerkki liiallisesta rasituksesta voi tulla esimerkiksi suuresta kierrosnopeudesta tai liiallisesta öljyn paineesta.

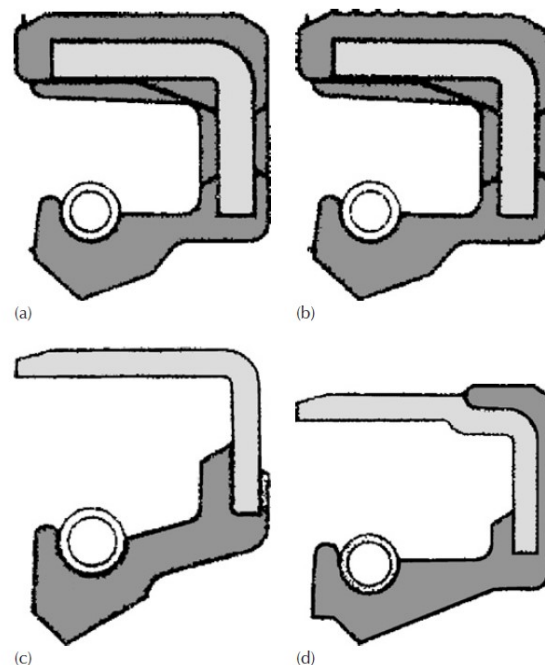
2.3 Huulitiivisteiden poikkileikkaus

Huulitiivisteiden poikkileikkaus näkyy kuvassa 3. Kuvaan on merkitty useita eri parametreja, joilla on omat tehtävänsä tiivistyksessä. Parametrit voidaan määritellä monella eri tavalla. Seuraavaksi esitetyn tavan on esittänyt Johnston (1999). Tiivisteen eri osia ovat metallinen tukiranka, jousi ja tiivistävä elastomeerimateriaali.



Kuva 3. *Huulitiivisteiden poikkileikkaus (Johnston 1999)*

Parametreja muuttelamalla saadaan aikaan erilaisia poikkileikkausprofiileja (kuva 4) erilaisilla ominaisuuksilla.



Kuva 4. Erilaisia huulitiivisteiden poikkileikkauksia (Flitney 2007)

Poikkileikkauksia tutkimalla havaitaan, että kuvan 3 α ja β parametreillä on toistuva kaava. Öljyn puoleinen kulma eli β on aina suurempi kuin α . Toinen huomattava asia on jousen sijainti,

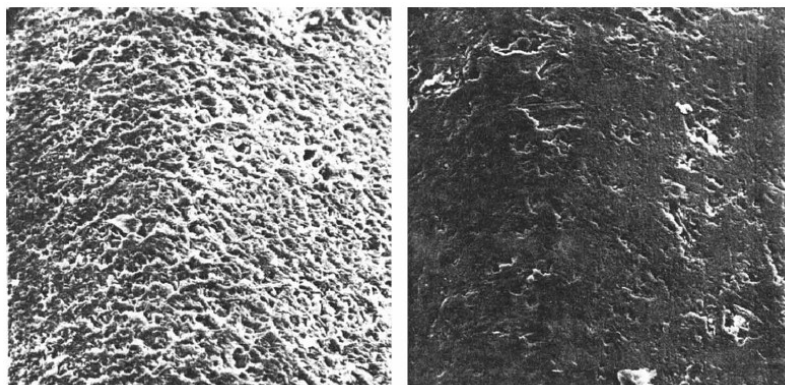
joka on kuvaa merkitty parametrilla R . Mikäli parametri R saisi negatiivisen arvon, voisi se aiheuttaa tiivisteiden kääntymisen (engl. "tilt"). Tiivisteiden vääränlainen asento aiheuttaa sen, että tiiviste ei enää toimi suunnitellulla tavalla. (Flitney 2007)

2.4 Huulitiivisteiden toimintaperiaate

Huulitiivisteiden perustoiminta periaate voidaan jakaa kahteen osaan. Staattinen ja dynaaminen tiiveys. Kun akseli ei pyöri puhutaan staattisesta tiiveydestä. Tämä perustuu esijännityksestä tiivisteiden ja lainerin välillä. Tiiviste on suunniteltu siten, että sen sisähalkaisija on pienempi kuin lainerin halkaisija. Lisäksi tiivisteiden sisällä oleva jousi luo jännityksen ja pinnat puristuvat yhteen. Dynaaminen tiiveys perustuu pumppausefektiin. Staattisesta tilasta kiihdyttäessä lähestytään dynaamisen tiiveyden vaatimia olosuhteita. Kun nämä olosuhteet saavutetaan, on löydetty pumppauspiste. Tässä pisteessä pumppausefektin teho ylittää rajan, jonka jälkeen tiiviste toimii suunnitellulla tavalla.

Kuten Jagger (1957) kokeellisessa tutkimuksessaan todistaa, syntyy huulitiivisteiden ja lainerin väliin öljyfilmi. Tarkemmin sanottuna tiivisteiden ja lainerin välillä on mikronien paksuinen öljykerros. Tämä tarkoittaa, että täytyy olla jokin mekanismi, joka estää öljyn siirtymisen kalvon läpi. Täytyy myös olla olemassa mekanismi, joka irrottaa tiivisteiden lainerista. Nämä ominaisuudet liittyvät tiivisteiden pinnankarheuteen (engl. "asperities"). Pinnan epämuodostumat toimivat, kuten pienet liukulaakerit, joissa pyörivä akseli aiheuttaa paineen kasvua. Näin ollen tiivisteiden pinta irtaantuu lainerista. Tämä onkin syytä ottaa huomioon tiivistemateriaalin valmistuksessa. (Salant 2013)

Kuvassa 5 näkyy merkittävä ero kahden eri tiivisteiden välillä. Näistä vasemman puoleisessa on huomattavasti enemmän edellä mainittuja epämuodostumia. Oikean puoleisessa vastaavasti on havaittavissa, että tiivisteiden pinta on tasaisempi. Näistä tiivisteistä vasemmanpuoleinen on tiivis ja oikeanpuoleinen vuotaa. (Horve 1991)

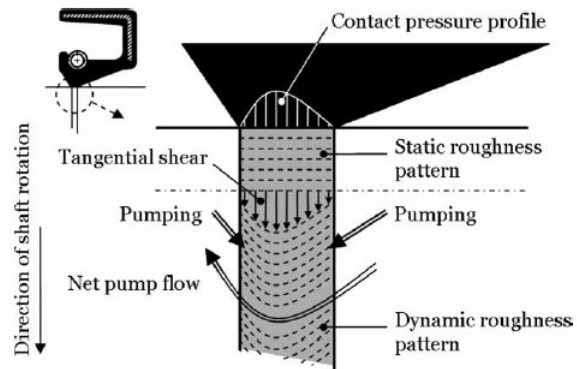


Kuva 5. Tiivisteiden pinnankarheus: vuotamaton- (vasen) ja vuotavatiiviste (oikea) (Horve 1991)

Tiivisteiden kuluessa sen pinta muokkaantuu johdonmukaisemmaksi. Helposti muokkaantuva tiiviste alkaa siten vuotaa aikaisemmin kuin tiiviste, joka pitää muotonsa. Horve näyttääkin, että tiivisteiden pinnankarheus täytyy olla huomattavasti suurempi kuin sen vastinpinnan. Täysin uuden valetun tiivisteiden pinnankarheus vastaakin kuvan 5 oikeanpuoleista tapausta eli tasaista pintaa. Tiivisteiden pinnalta täytyy kuluttaa pinta (rubber skin) pois, että sen ominaisuudet toimivat suunnitellusti. Horve myös esittää, että pinnan leveyden täytyy olla riittävän suuri, jotta se sisältää tarpeeksi epämuodostumia ollakseen tiivis. Eli voidaan ajatella, että tarvittavan tiivistys pinta-alan tarve muuttuu tiivisteiden käyttöiän aikana.

Edellä mainittu muokkaantuminen näkyy tietynlaisen kuvion toistuvuutena tiivisteissä. Se milloin tämä kuvio ja epäpuhtaudet pinnalla muodostuvat, riippuu erittäin suuresti olosuhteista, joissa tiiviste operoi. Kun tiivistettä ajetaan sisään, sen esipinta kuluu. Sen lisäksi myös tiivisteiden kärkeä, eli kosketuspinta, kuluu tasaiseksi ja kosketuspinta kasvaa. (Paige 2004)

Pyörivä akseli pyrkii pumppaamaan epämuodostuksissa olevaa öljyä tiivistepinnan ohi. Epäpuhtaudet kuitenkin ohjaava fluidia kohti tiivisteiden kärkeä. Oikein suunnitellussa tiivisteissä näiden fluidien kokonaisvirta on kohti öljypuolta. Tätä esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Öljyn pumppausmekanismi (Baart 2009)

Horve (1996) toteaa kirjassaan, että mitä enemmän edellä mainittuja epäpuhtauksia tiivisteiden pinnassa on, sitä suuremman pumppaus efektin se aiheuttaa. Tiivisteiden täytyy myös liukua akselin pinnalla. Akselin pyöriminen aiheuttaa liukumista ja sen seurauksena öljyfilmi leikkaantuu. Öljyn leikkaantumisen on vaikutus se ominaisuuksiin. Öljyn ominaisuuksia käsitellään myöhemmin.

Testien aikana testataan kuinka tiivisteiden ja lainerin välinen kulma vaikuttaa tiiveyteen. Horve (1985) osoittaa, että kulma kasvattaa pumppausefektin. Tiivisteiden pinta liikkuu vastinpinnallaan sinusoidaalisesti. Vaikka pumppausefektin kasvu on toivottava ominaisuus, niin kulmalla on kuitenkin negatiivisia vaikutuksia. Tällaisessa tapauksessa tiivisteiden pintaan tulee korkean ja matalan paineen vaikutus alueita. Painemuutokset, johtavat korkeampaan lämpötilaan ja siten selvään tiivisteiden käyttöiän laskuun. (Horve 1985)

3. TESTIN ESITTELY

Testissä pyritään simuloimaan todellista Azipodin toimintaa tilassa, jossa sitä voidaan tutkia. Testien tekeminen jo asiakkaalle myydyssä laitteessa on käytännössä mahdotonta. Laivat ovat jatkuvassa käytössä ja pidempiaikaiset telakoinnit ovat hyvin harvinaisia. Azipod laite on myös suunniteltu hyvin kompaktiksi. Laitteen sisällä on siis hyvin vaikea tehdä minkäänlaista tutkimustyötä. Jotta tutkittava tiiviste saataisiin esille todellisesta käytössä olevasta Azipod laitteesta, vaatisi se suuren määrän töitä. Laitteita voidaan huoltaa telakointien yhteydessä. Telakointien pituus kuitenkin pyritään minimoimaan, että alus voi jatkaa rahan tuottamista yritykselle. Vaikka testi pyrkii simuloimaan todellista tilannetta, täytyy kuitenkin testit suorittaa hallitulla testiohjelmalla. Tarkkaan suunnitellulla testiohjelmalla saadaan aikaa vertailukelpoisia tuloksia. Todellisessa käytössä laitteen ajosykli vaihtelevat muun muassa reittien, kuorman ja merivirtojen takia. Esimerkiksi satamaan ajossa voidaan tehdä useita pieniä korjausliikkeitä. Mikäli alus toimii reitillä, jossa on useita pysähdyksiä, on sen rasitus huomattavan erilainen pitkän välimatkan aluksiin verrattuna. Laite voi myös toimia jäisissä olosuhteissa, joka myös vaikuttaa laitteen vastaanottamaan kuorma profiiliin.

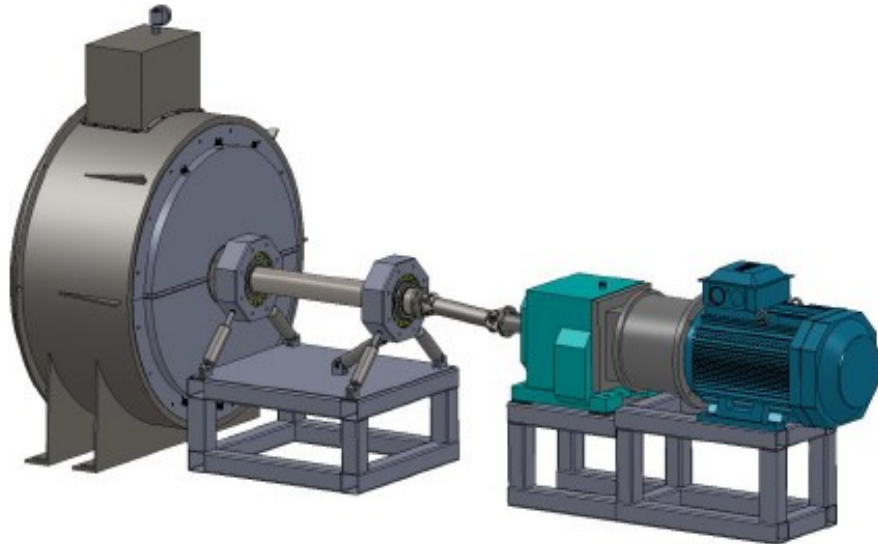
Testit voidaan suorittaa useilla tiivistysmateriaaleilla, useissa eri olosuhteissa. Testin tarkoituksena on ensisijaisesti selvittää öljyn kulumiseen liittyvä juurisyy tai -syyt. Toinen kiinnostava asia on tiivisteiden ominaisuudet vaihtelevissa ja vaikeissa olosuhteissa. Sen sijaan testin ei ole tarkoitus antaa vastauksia uudenlaisen tiivisteiden kehittämiseen. Tiivisteiden kunnonvalvonta ei myöskään kuulu testin laajuuteen (ABB 2018).

Testissä tutkittavia muuttujia ovat

1. lämpötilat
 - a. säiliöissä
 - b. tiivistekammioissa
 - c. tiivisteissä
2. paine
 - a. säiliöissä
 - b. tiivistekammioissa
 - c. vesikammiossa.

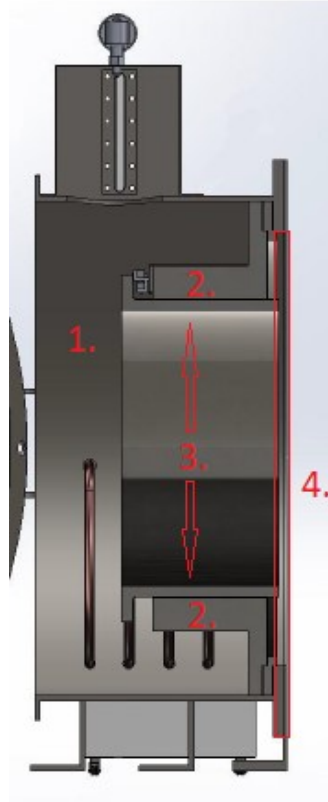
3.1 Testilaitteisto

Testilaitteisto on yksinkertaistettu versio todellisesta Azipodin potkuriakselista, AFT-tiivisteestä, lainerista ja niitä ympäröivistä laitteista. Lisäksi, laitteistoon kuuluu testissä käytettäviä antureita, hydraulisylintereitä ja muita komponentteja, jotka mahdollistavat olosuhteiden muutokset ja mittaukset. Komponenteista vain tiiviste ja laineri ovat sellaisia, jotka vastaavat täysin todellisessa laitteessa käytettäviä komponentteja. Muut komponentit ovat huomattavan erilaisia todellisuudessa. Näistä esimerkiksi moottorin koko on huomattavasti pienempi. Merkittävää myös testin kannalta on se, että sitä ei kapseloida rungon sisään. Normaali tilanteessa koko laitteisto on rungon sisällä ja sen sisällä kierrätetään ilmaa. Testien aikana laitteisto sijaitsee sen sijaan avonaisessa tilassa. Lämmönsiirtyminen laitteistosta pois tapahtuu siis luonnollisen konvektion avulla. Tämä korostaa lämpötilan seurannan tärkeyttä testien aikana. Testilaitteiston on suunnitellut Elomatic. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty testilaitteisto.



Kuva 7. Kokonaiskuva testilaitteistosta (ABB 2018)

Kuvan 7 avulla on helppo hahmottaa testilaitteisto. Laitteiston perustoiminta periaate on yksinkertainen. Voimansiirron ensimmäisenä komponenttina on sinisellä korostettu sähkömoottori, joka tuottaa laitteiston akselia simuloivan pyörimisvoiman. Seuraavana komponenttina on turkoo-silla värillä korostettu vaihdetta, jonka avulla muunnetaan moottorin kierrosnopeuden testille so-pivaksi. Moottorin ja vaihteen välinen harmaa kotelo suojaa kytkintä. Sen tarkoituksena on liittää moottori ja vaihde toisiinsa. Keskimmäiselle alustalle on kiinnitetty kaksi laakeripesää hyd-raulisylinterien päällä. Hydraulisylinterien tehtävää käsitellään myöhemmin. Kuvan vasem-massa laidassa oleva pyöreän muotoinen säiliö sisältää testin kannalta oleelliset osat eli AFT-tiivisteen ja lainerin. Tätä osuutta on syytä tarkastella vielä tarkemmin, koska se sisältää vuotokohdan ja siihen liittyvät komponentit. Kuvassa 8 on poikkileikkaus kyseisestä osuudesta.



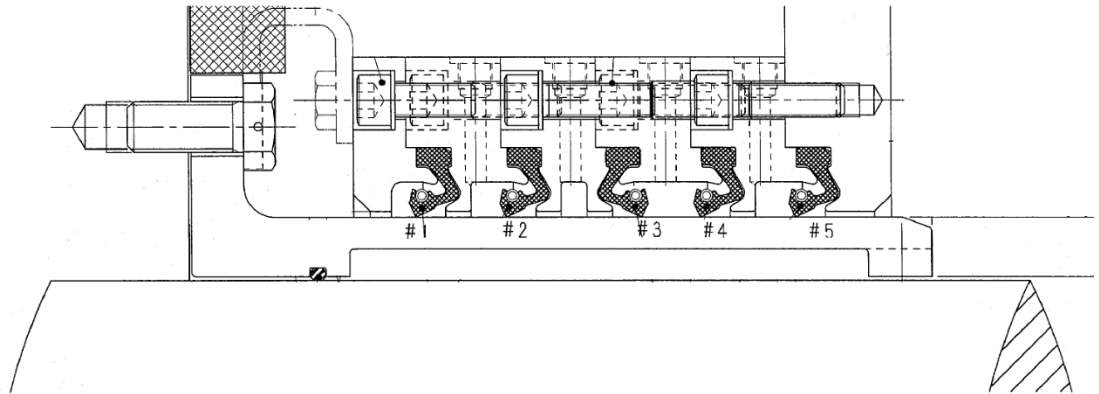
Kuva 8. Poikkileikkaus testin tärkeimmistä komponenteista (ABB 2018)

Tässä kuvassa on numerolla 1 merkitty säiliö, joka on täynnä vettä. Säiliö simuloi järjestel-mässä merta. Tiivistepakka on merkitty numerolla 2. Sitä vasten on laineri numerolla 3. Oikeassa

reunassa on myös nähtävissä hyvin kapea säiliö, joka on puolillaan öljyä ja simuloi laakeria. Se on merkitty numerolla 4.

3.2 Tiivistepakka ja painejärjestelmä

Tiivisteiden poikkileikkaus kuvassa 9 antaa paremman käsityksen tiivisteiden toiminnasta ja laajuudesta. Tiivisteitä on yhteensä 5 ja tästä syystä puhutaankin tiivisteiden sarjasta eli tiivistepakasta.



Kuva 9. Poikkileikkaus (ABB 2018)

Tiivistepakkaan liittyy siis viisi eri huulitiivistettä korostettuna mustalla ja numeroituna. Laitteen potkuri on kuvan vasemmassa laidassa ja laakeri oikeassa. Tiivisteiden välisiä tiloja kutsutaan kammioiksi ja niitä on neljä kappaletta. Vasemmassa reunassa tiivisteiden ulkopuolella olevassa tilassa on vettä eli meri. Oikeassa reunassa on vastaavasti öljyä eli laakeritila. Kammioista ensimmäisessä on ilmaa ja muissa öljyä. Huulitiivisteisiin liittyy aina aineen siirtymistä tiivisteiden ohi. Kuvaa 9 tutkiessa on hyvä huomata mihin suuntaan nesteen siirtyminen on suunniteltu. Nesteen tarkoitus siirtyä tiivisteiden rungon puolelta pois päin. Eli esimerkiksi tiivisteillä 1 ja 2 nesteen kokonaissuunta on vasempaan. Nesteen siirtymistä tutkittiin tarkemmin kappaleessa 2.4. Kammioiden laskenta alkaa potkurin päästä eli vasemmalta. Tässä kuvasta näkee myös tarkemmin lainerin ja akselin. Laineri on siis tiivistepintoja vasten ja laineri asennetaan akselin päälle.

Öljyjärjestelmää kuvaava diagrammi on salainen ja täten sitä ei voi työssä esittää. Järjestelmää voidaan kuitenkin kuvailla sanoin. Öljynpaine tiivistekammiossa voidaan luoda painovoiman avulla tai pumpuilla. Tiivistekammioille menevissä öljylinjoissa on painesäädin, jolla voidaan säätää kammioiden välistä paine-eroa. Paine-ero on merkittävässä roolissa tiivisteiden toiminnan kannalta ja sitä käsitellään tarkemmin myöhemmin. ACU kontrolloi ilman painetta säiliöissä ja toisessa tiivistekammiossa. Vesisäiliölle tulevassa painelinjassa on myös painesäädin, jolla säädetään säiliön painetta haluttuun arvoon. Kokonaisuudessaan järjestelmän toiminta on hyvin yksinkertainen. Järjestelmään kuuluu pumppuja, joilla voidaan luoda painetta. Tätä painetta säädetään säätimellä ja sitten johdetaan se haluttuun paikkaan, esimerkiksi tiivistekammioon. Vuotava öljy kerätään talteen.

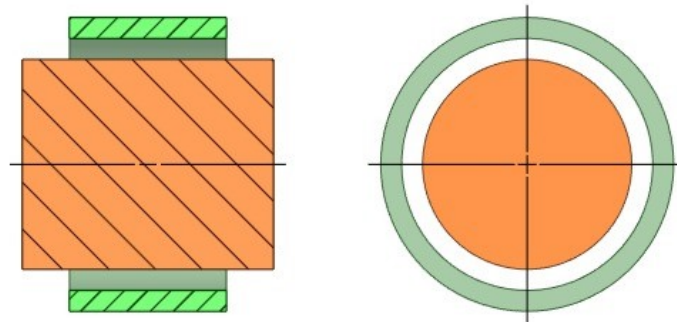
3.3 Testisarjat

Testisarjoja on yhteensä kolme erilaista ja näistä jokainen sisältää useita testejä. Yhteistä sarjoille on se, että niissä etsitään pumppauspistettä. Merkittävin ero testisarjojen välillä voidaan havaita kuvista 10, 11 ja 12. Näissä kuvissa tiivistepakka on vihreän värinen ja akseli oranssi. Kuvista nähdään myös kappaleiden keskiviivat. Keskiviivojen avulla voidaan havaita tehdyt poikkeamat. Olosuhteet testien välillä vaihtelee. Pumppauspistettä käsiteltiin kappaleessa 2.4. Tuloksissa voidaan havaita, että kuinka mikäkin muutos testissä on siirtänyt pumppauspistettä.

3.3.1 Ensimmäinen testisarja

Ensimmäisessä testisarjassa testataan normaalia toimintaa uudella tiivisteellä. Testisarjan tarkoituksena on selvittää systeemin normaali toiminta, ja se miten esimerkiksi kierrosnopeuden muutokset korreloivat tutkittaviin muuttujiin. Testisarjan aikana tehdään erinäisiä muutoksia kierrosnopeuksiin ja tiivistekammioiden paineisiin. Ensimmäisessä testisarjassa (ABB 2018) tilanne on seuraava:

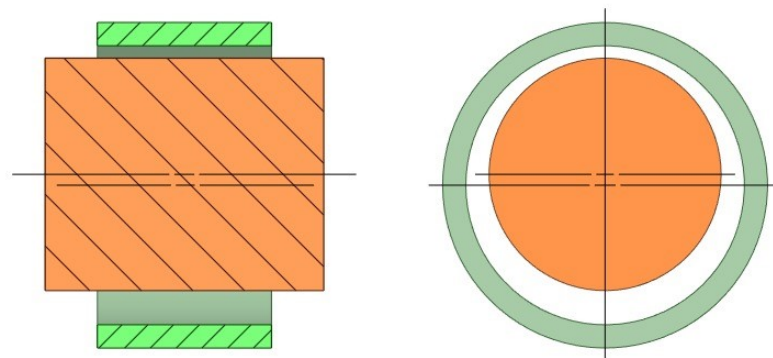
- uusi huulitiiviste materiaalina F06
- lämpötilana on huonelämpötila
- säiliöiden pinta normaalilla tasolla
- ACU säädetty 40 l/min
- öljynpainesäädin säädetty 0,35 bar:iin
- vesisäiliö täytetty ja paine säädetty 0,55 bar:iin
- Venttiili toisen tiivistekammion ja vuotosäiliön välillä suljettu
- öljynkierto pumppuja ei ole asennettu



Kuva 10. Kuvanto ensimmäisen testisarjan asettelusta

3.3.2 Toinen testisarja

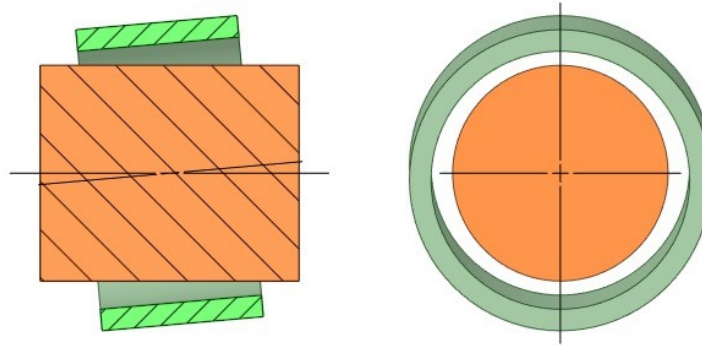
Toinen testisarja suoritetaan hyvässä kunnossa olevalla tiivisteellä, ja siinä on tarkoitus selvittää systeemin toimintaa epänormaalissa tilanteessa. Testit suoritetaan siten, että akseli ja laineri on asetettu epäkeskoisesti tiivisteeseen nähden. Muutoin lähtötilanne on sama kuin ensimmäisessä testisarjassa. Testien aikana tehdään muutoksia kierrosnopeuteen ja epäkeskoisuuden määrään. (ABB 2018)



Kuva 11. Kuvanto toisen testisarjan asettelusta

3.3.3 Kolmas testisarja

Kolmannessa testisarjassa pyritään samaan asiaan kuin toisessa testisarjassa. Epäkeskisuuden sijaan luodaan kulmavirhe lainerin ja tiivisteen välille. Tässäkin testisarjassa tehdään muutoksia akselin kierrosnopeuteen. Myös kulmavirheen määrää muutetaan sarjan aikana. (ABB 2018)



Kuva 12. Kuvanto kolmannen testisarjan asettelusta

4. KOEJÄRJESTELYT

Koejärjestelyt on toteutettu siten, että testit voidaan tehdä hallitusti. Tämän takia laite on tietysti siirrettävä tilaan, jossa sitä voidaan käsitellä. Tämä aiheuttaa eroavaisuuksia todellisen käyttötapauksen kanssa. Suurin eroavaisuus on, että laite ei ole enää veden pinnan alapuolella. Tilanne on täysin erilainen, joten eroja on paljon. Näistä suurimman osan vaikutus testien tuloksille on kuitenkin hyvin merkityksetön. Tässä kuitenkin käsitellään sellaisia tekijöitä, joilla saattaa olla vaikutusta testin suorittamiseen ja tuloksiin. Tästä syystä näitä tekijöitä on syytä tarkastella tarkemmin.

4.1 Lämpötila

Merkittävin vaikutus lämpötilaan todellisessa käyttötilanteessa on meriveden lämpötilalla. Testiolosuhteissa veden määrä on olematon verrattuna todelliseen tilanteeseen. Todellisessa tilanteessa saatavilla olevan veden määrä on käytännössä loputon. Testin aikana saatavilla kuitenkin äärellinen määrä vettä. Näin ollen testissä vedenlämpötila on hyvin altis vaihteluille. Tämän lisäksi vesi on suorassa kosketuksessa tiivistepakan uloimpaan tiivisteseeseen, joten sen vaikutus on merkittävä. Tämä luo peruslämpötilan tiivisteessä. On hyvä myös huomata, veden pinnan taso suhteessa tiivisteseeseen. Mikäli koko tiiviste ei ole pinnan alla, voi tiivisteseeseen tulla sisäisiä lämpötila eroja. Vesi on kosketuksissa pyörivän akselin kanssa, joten sen lämpötila tasaantuu hyvin nopeasti.

Tiivisteiden toisella puolella on lähes identtinen tilanne. Siellä on kuitenkin enemmän yhtäläisyyttä todellisen käyttötapauksen kanssa. Öljyä on molemmissa tapauksissa saatavilla rajoitettu määrä. Todellisessa tilanteessa öljy on laakerin sisällä. Siellä öljy liikkuu huomattavasti enemmän kuin sitä simuloivassa säiliössä. Tämä kasvattaa lämpötilaa.

4.1.1 Lämpötilan vaikutus öljyyn

Öljyn lämpeneminen vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Niistä tärkein tiiveyden kannalta on viskositeetti. Öljyn viskositeetti pienenee, kun sen lämpötila kasvaa (Mang 2014). Kontaktipinnan lämpötila määrittää öljyn lämpötilan, joka vaikuttaa suoraan tiivistystehokkuuteen (Guo *et al.* 2014). Aiemmin mainittiin, että akselin pyöriminen aiheuttaa öljyfilmin leikkaantumista. Näin ollen voidaan sanoa, että pieni viskositeetti aiheuttaa pienemmän leikkausvoiman ja siten vähemmän kitkaa. Näin pyörimisen aiheuttama lämmönkasvu tiivisteiden kärjessä on pienempi, pienemmän viskositeetin öljyllä. On tärkeää huomata, että tämä ei kuitenkaan suoraan tarkoita parempaa tiiveyttä. Kyseinen leikkausvoima toimii osana tiivisteiden pumppausmekanismeja.

Käytössä oleva bioöljy on erityisen herkkä lämpötilalle. Lämpötilan vaikutus on yksi merkittävimmistä ongelmista, hydrolyysin ja hapettumisen lisäksi, bioöljyn teolliselle käytölle. Bioöljyt aiheuttavat ongelmia matalissa lämpötiloissa. Niiden jähmettymislämpötila on suhteellisen korkea. Siihen voidaan kuitenkin vaikuttaa lisäaineilla. Lisäaineet vaikuttavat myös muihin öljyn ominaisuuksiin. (Reeves *et al.* 2017).

4.1.2 Lämpötilan vaikutus tiivisteseeseen

Tämän lisäksi kosketuspinnassa on pieni alue, joka on kitkan vaikutuksesta, suuremmassa lämpötilassa. Lämpötilan tiedetään vaikuttavan materiaalin jäykkyyteen ja siten pintapaineeseen. Lämpötila vaikuttaa myös siten kitkaan ja materiaalien kulumiseen (Frölich *et al.* 2014). Tästä syystä onkin tärkeää, että testissä saadaan selville tämän pienen alueen, tiivisteiden kärjessä, lämpötila. Mikäli tiivisteiden kärjessä on vaikuttanut liian korkea lämpötila testien aikana, voidaan se havaita testien jälkeen. Kun tiiviste irrotetaan testien jälkeen, täytyy tarkistaa tiivisteiden kärki halkeamien ja kovettumien takia. Ne ovat seurausta korkeasta lämpötilasta.

Tiivisteiden toisella puolella oleva öljy on myös altis lämpötilavaihteluille. Todellisessa tilanteessa öljysäiliö sijaitsee laivan rungon sisäpuolella. Siellä lämpötilan vaihtelut ovat pieniä. Koejärjestelyt ovat sellaiset, että öljysäiliön lämpötila riippuu ulkolämpötilasta. Mikäli testit kestävät pitkään niin lämpötila vaihtelut saattavat olla hyvinkin suuria. Lisäksi testejä tehdään seisottamalla öljyä ja juoksuttamalla sitä. Staattisessa tilanteessa öljyn lämpötila saattaa paikallisesti nousta.

Frölich *et al.* (2014) mainitsee kirjassaan, että tietyissä sovelluksissa lämpötila on kriittinen tekijä. Esimerkiksi he antavat tapaukset, joissa on kyseessä suuret halkaisijat ja korkeat kehänopeudet. Testissä nämä molemmat asiat toteutuvat.

4.2 Laakerin öljytilan erot

Yksi testin osa-alue on aiheuttaa aksiaalista räsytystä testiakselille. Tämä voisi aiheuttaa paikallisia painevaihteluita ja siten myös muuttaa paine-eroa tiivisteiden molemmilla puolilla. Koska koejärjestelyt ovat sellaiset, että merta ja laakeripesää simuloivat säiliöt eivät voi olla todellisen kokoisia, on asiaa syytä miettiä tarkemmin.

Laakeria simuloiva öljysäiliö on tilavuudeltaan pieni. Kun akseli siirtyy aksiaalisesti, muuttaa se samalla öljysäiliön tilavuutta. Tämä aiheuttaa tilassa painevaihtelua. Todellisessa tilanteessa öljysäiliö on tilavuudeltaan suurempi ja näin painevaihtelu on pienempi. Täysin vastaava ilmiö voidaan havaita tiivisteiden toisella puolen vesisäiliön kanssa.

Kun akselia räsytetään aksiaalisesti, on mahdollista, että tiivistys pinta siirtyy akselin suunnassa. Tämä aiheuttaa tiivisteessä normaalista poikkeavaa kulumista. Pinnan ja tiivisteiden välillä ei pitäisi olla tämän suuntaista liikettä. Jos akselin liike tapahtuu sykleissä, voi se aiheuttaa pumpausta. Tämä ei ole kuitenkaan tarkoituksen mukaista vaan voi vaikuttaa tiivisteiden toiminnan kannalta olennaiseen pumppausmekanismiin. Fluidien liikettä voi tällöin tapahtua mihin suuntaan tahansa. Paine erot voivat myös irrottaa tiivisteiden lainerin pinnasta ja siten rikkoa tiivistävän öljyfilmin.

Laakeritila on staattisessa tilanteessa normaalissa ilmanpaineessa. Pyörimisliike aiheuttaa kuitenkin paineen kasvua. Testiympäristössä näin ei kuitenkaan tapahdu, koska laakerin tilalla on pelkkä öljysäiliö.

4.3 Voitelujärjestelmä ja järjestelmämuutokset

Voitelujärjestelmä mahdollistaa tiivisteiden tarkoituksen mukaisen toiminnan. Se hallitsee voiteluaineiden ja paineilman määrää ja painetta tiivisteiden kammioissa. Tiivisteiden toiminta perustuu hyvin vahvasti paine-eroille kammioissa. Osa paineesta tuotetaan gravitaation avulla. On siis erittäin tärkeää, että voitelujärjestelmän toiminta vastaa todellista tapausta. Kammioiden paineita tarkkaillaan jatkuvasti testien aikana. Virheet on siis helppo havaita. Voitelujärjestelmään joudutaan tekemään joitakin muutoksia. Näitä muutoksia ja niiden vaikutuksia on hyvä selvittää tulosten kannalta.

4.3.1 Järjestelmämuutokset

Suurin ero järjestelmillä on, että testijärjestelmässä akselin ei täydy pyöriä vertikaaliakselin suhteen. Todellisessa järjestelmässä öljylinjat tulevat rungon sisäpuolelta pyörivään kapseliin. Tämän toteuttaminen vaatii öljylinjoihin kiertonivelen (engl. swivel). Testijärjestelmä ei pyöri, joten niveliäkään ei siinä ole.

Todellisessa järjestelmässä tiivisteiden öljykammioista on putkilinja öljynkeruustiaan. Astia on vaikeasti saatavilla kapselin sisällä. Öljy voidaan pumpata pois astiasta laivan rungon sisäpuolelle. Testijärjestelmässä kyseistä ongelmaa ei ole, joten pumpulle ja paluulinjalle ei ole tarvetta.

Todellisen järjestelmän öljysäiliön ja tiivisteiden korkeusero on huomattavan suuri. Korkeusero kehittää öljynpaineen. Testijärjestelmään ei ole tilansäästö syistä kannattavaa luoda vastaavaa korkeuseroa, vaan paine on luotu paineistamalla öljysäiliö paineilmalla. Myös vesisäiliö täytyy paineistaa, että se vastaa todellista tilannetta.

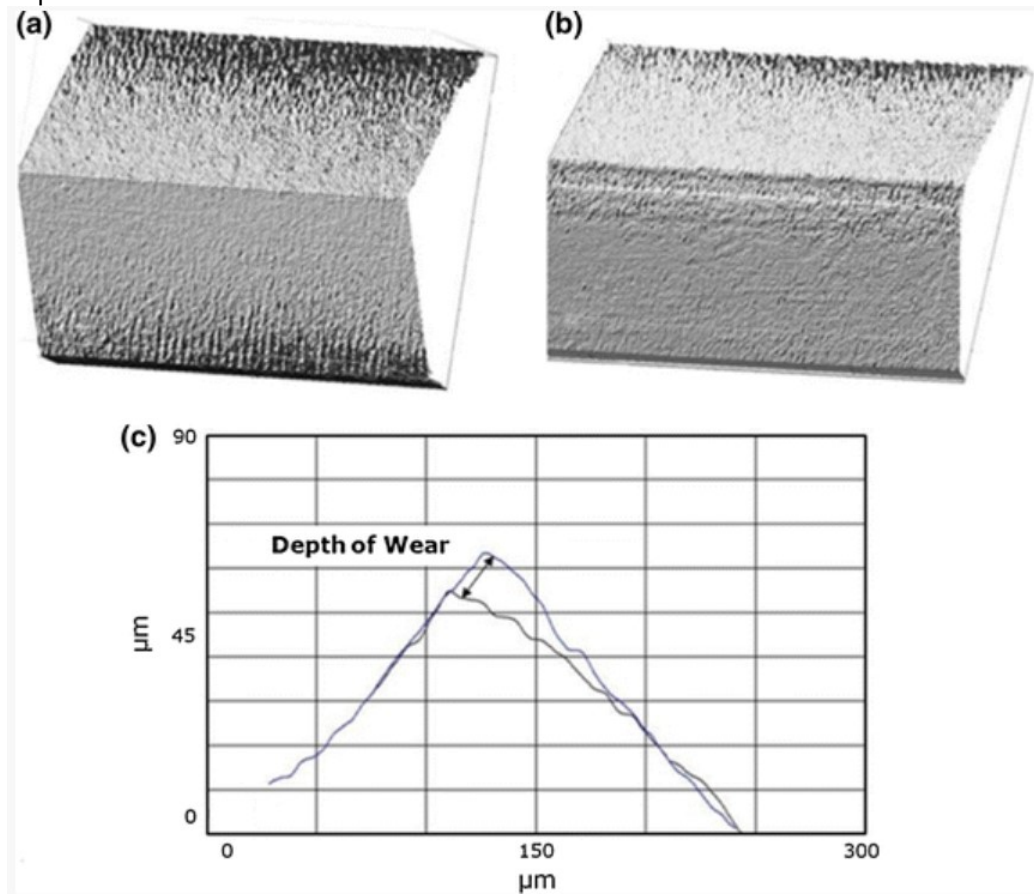
4.4 Öljyn ja veden laatupoikkeamat

Todellisessa käyttötapauksessa öljyyn on mahdollista päästä epäpuhtauksia. Esimerkiksi kun öljyvuoto on havaittu ja säiliöön lisätään öljyä epäsuotuisissa olosuhteissa. Koejärjestelyt mahdollistavat öljynlaadun järjestelmällisen tarkkailun. On siis mahdollista, että todellisessa tilanteessa öljyn epäpuhtaudet vaikuttavat vuodon määrään.

Vedellä tilanne on hyvin samankaltainen. Veden laatu voi vaihdella hyvinkin merkittävästi todellisen käytön aikana. Esimerkiksi veden laatu on selvästi heikompä Kiinan satamissa kuin Jäämerellä. Veden laatuongelmat aiheuttaisivat kuitenkin ongelmia uloimmalla tiivisteellä ja siten veden migraatiota sisäänpäin.

Leichner *et al.* (2011) tekivät kokeen, jossa testattiin partikkeleiden vaikutusta akselin pinnan ja radiaali huulitiivisteen kulumiseen. Testin järjestelyissä on hyvin paljon samankaltaisuuksia, kun ABB:n suorittamassa testissä. On huomattava, että erona on akselin pinnanlaatu ja kovuus. ABB:n testissä käytetään kromi pinnoitettua laineria ja Leichnerin testissä kahdella eri tavalla koneistettua pintaa. Testissä syötetään hyvin pieniä partikkeleita, alle 0,1 mikronia, tiivisteen alle. Partikkeleita syötettiin virtaavan ilman avulla. Testi aika oli 600 tuntia.

Kyseisen testin tulos on, että partikkeleiden vaikutuksen voi havaita selvästi. Jopa alle 150 tunnin testi aiheuttaa merkittävää kulumista sekä tiivisteessä, että akselin pinnassa. Seuraavassa kuvassa (kuva 13.) nähdään, minkälainen vaikutus testillä oli tiivisteen profiiliin. Kuvassa tiiviste a on uusi tiiviste ja b on 600 tunnin testin läpi käynyt tiiviste. Leichner *et al.* Mainitsee myös päätelmissään, akselin pinnanlaadun heikkenemisen eroista. Akseli, jolla on parempi pinnanlaatu, kuluu nopeammin.



Kuva 13. Leichner *et al.* (2011) suorittaman testin vaikutus tiivisteen profiiliin.

5. TULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Yleisesti näiden tutkittujen asioiden vaikutus testin tuloksiin on työn perusteella pieni, muttei kuitenkaan olematon. Merkittävimmin vaikuttajina voi pitää asennuksessa tapahtuvia virheitä ja lämpötilaa. Asennuksessa tapahtuvia virheitä ei saa tapahtua tai tulokset ovat virheellisiä. Tiivistysten asennus testien aikana on sinänsä poikkeuksellinen, että asennus tehdään tarkoituksella virheellisesti. Asennus suoritetaan kuitenkin helpotetuissa olosuhteissa, joten siinä tapahtuvan virheen todennäköisyyttä voidaan pitää pienempänä kuin todellisessa asennuksessa. On kuitenkin mahdollista, että osa havaituista vuodoista ovatkin johtuneet huollon yhteydessä tapahtuneista virheistä. Koska testien aikana joudutaan tiivistettä vaihtamaan useasti eli toistamaan asennus useita kertoja on tämä syytä ottaa huomioon.

Lämpötilan vaikutukset tulevat esiin vasta pitkän käyntiajan jälkeen. On kuitenkin syytä visuaalisesti tutkia tiivistysten kunto ja elastisuus testien jälkeen. Koska testeissä tehdään keinotekoisesti virheellinen akselikulma, on tämä asia merkittävämpi. Kulma akselin ja tiivisteiden välillä yhdistettynä elastisuuden menettäneeseen tiivisteeseen aiheuttaa varmasti vuotoa. Lämpötila on myös testissä helppo tarkkailla. Mikäli nesteiden tai ulkoilman lämpötila aiheuttaa ongelmia on se helposti korjattavissa.

Öljy- ja vesisäiliöiden koot ovat kuitenkin tekijöitä, joita on vaikeampi muokata. Kun testeissä aiheutetaan aksiaalista kuormaa, täytyy sen olla samassa suuruusluokassa todellisuuden kanssa. Tämä voidaan kuitenkin havaita, koska testeissä mitataan painetta öljykammioissa.

Ongelmien esiintyvyyden on uskottu johtuvan öljyn ja tiivisteiden yhteensopimattomuudesta. Tätä ei kuitenkaan testisarjojen aikana testata. Tästä löytyi myös mainintoja kirjallisuudesta. Öljyn laatu on testin tulosten kannalta hyvin tärkeä. Jos tiivistemateriaali ja öljy eivät sovi käytettäväksi samassa järjestelmässä, aiheuttaa se virheellisiä tuloksia testissä. Yhteensopivuutta onkin syytä selvittää tiivisteiden ja öljyn valmistajalta.

Testissä käytettävän veden laadulla voi olla vaikutusta testin tuloksiin. Onkin tärkeää, että vesi vaihdetaan testien välissä. Koska testi keskittyy asento virheisiin, täytyy veden laadun olla testeissä yhtenäinen. Erilaatuisten vesien testaaminen ei kuulu tämän kokeen laajuuteen.

Voitelujärjestelmän muutokset ovat sellaisia, että olosuhteet eivät tiivisteellä muutu. Näin ollen myös testin tuloksien voi sanoa olevan vertailukelpoisia. Yleisesti testin suunnittelusta ja valmistelusta voi olettaa tulevan hyviä tuloksia. Työn yhteydessä löytyi useita maininnan arvoisia kohtia, joita tulee pitää silmällä. Kuitenkin niiden vaikutus suhteutettuna tähän kyseiseen testiin on pienet. Testeissä on useita riskialttiita tekijöitä, joita tulee huomioida jatkuvasti testien ajan. Tämä vaatii testin toimittavilta henkilöiltä tarkkuutta ja pitkäjänteisyyttä.

LÄHTEET

ABB, Tuotteet. (2019), ABB Marine & Ports. Saatavissa: <https://new.abb.com> > Home > Offerings > Marine > Electric Propulsion > Azipod® Gearless Propulsion > Azipod® Propulsors For Ships

ABB, Azipod valintaohje. (2010), ABB Marine & Ports. Saatavissa: <https://new.abb.com> > Industries > Marine & Ports > Products > Azipod Propulsion > Documents > Azipod Selection Guide

ABB, Test program. (2018). Marine And Ports, Service, Arkisto, Test Program, vaatii käyttöikeuden.

Baart, P., Lugt, P., Prakash, B. (2009) Journal of Engineering Tribology, Vol. 223, Part J. pp. 347-358

Klein, B., Kirschmann, D., Haas, W. & Bertsche, B. (2010). Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), conference proceeding.

Flitney, R. (2007). Seals and sealing handbook, Chapter 3, Rotary Seals. Elsevier Science, pp. 105-281.

Frölich, D., Magyar, B. & Sauer, B. (2014) A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. Institute of Machine Elements, University of Kaiserslautern. Pp. 71-80.

Horve, L. (1985). The effect of operating parameters upon radial lip seal performance. SAE paper 841145.

Horve, L. (1991). The correlation of rotary shaft radial lip seal service reliability and pumpability to wear track roughness and microasperity formation, SAE paper 910530

Horve, L. (1996). Shaft Seals for Dynamic Applications, Marcel Dekker.

Jagger, E.T. (1957) Study of the lubrication of synthetic rubber rotary shaft seals, pp. 409–415.

Johnston, D.E. (1999) Design aspects of modern rotary shaft seals, Proc. I.Mech.E., Vol. 213, Part J.

Leichner, T., Franke, V., Sauer, B. & Aurich, J.C. (2011) Investigation of the tribological behavior of radial shaft rings and soft turned shafts under the influence of abrasive particles, Prod. Eng. Res. Devel., Springer-Verlag, saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s11740-011-0342-x>

Paige, J. & Stephens, L. S. (2004) Surface characterization and experimental design for testing of radial lip seal. 341-355.

Reeves, C.J., Siddaiah, A. & Menezes, P.L. J Bio Tribo Corros (2017) 3: 11. <https://doi.org/10.1007/s40735-016-0069-5>

Salant R.F. (2013) Rotary Lip Seal Analysis. In: Wang Q.J., Chung YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA

Santas, R., Korda, A., Tenente, A., Buchholz, K. (1999) P.H. Santas Mesocosm assays of oil spill bioremediation with oleophilic fertilizers

Mang, T. (2014) Viscosity Temperature Behaviour. Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg

Guo, F., Xiaohong, J., Mindong, L., Longke, W., Salant, R.F. & Yuming, W. (2014) Tribology International 78, pp.187–194